



UK Atomic
Energy
Authority

Riconoscimento di filamenti nel Tokamak sferico MAST – U

Dr. Sara Carcangiu, PhD

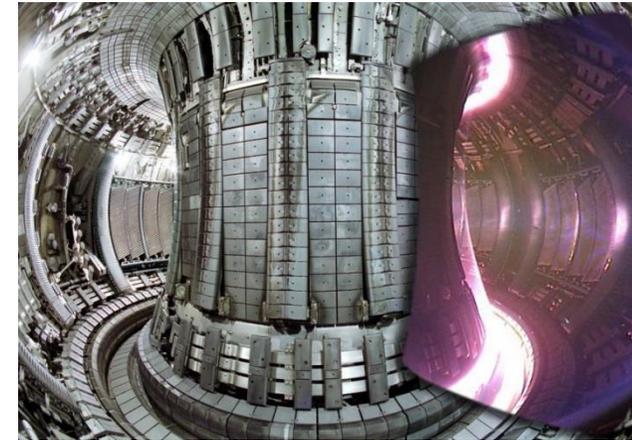
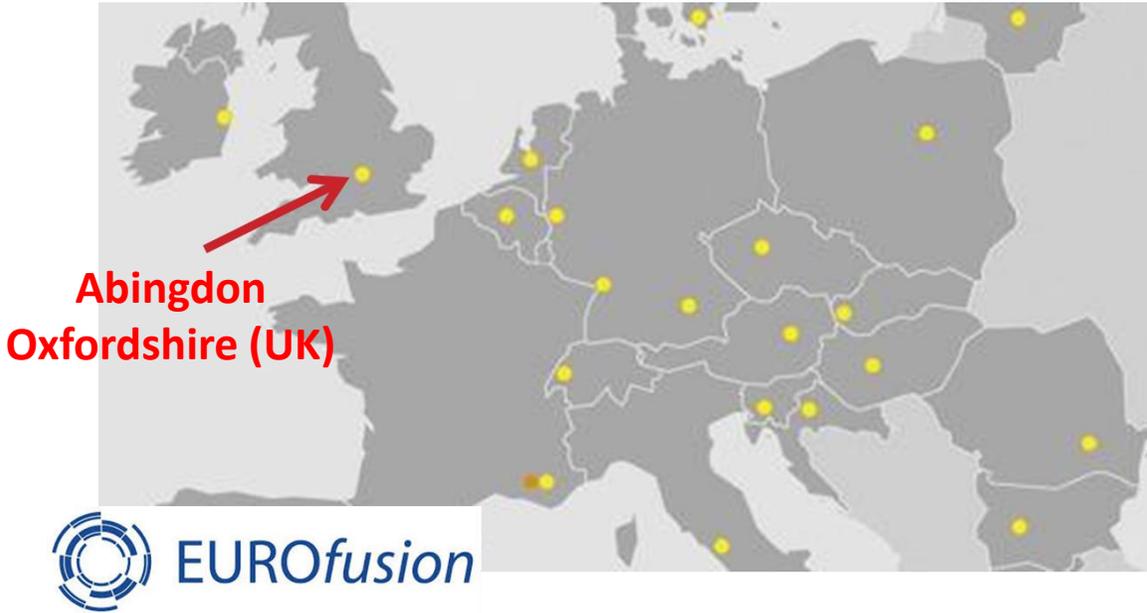


This work was funded by the RCUK Energy Programme
[Grant number EP/P012450/1]



Culham Centre for Fusion Energy - CCFE

Gestisce **JET (Joint European Torus)**, un importante progetto scientifico che coinvolge scienziati di tutta Europa

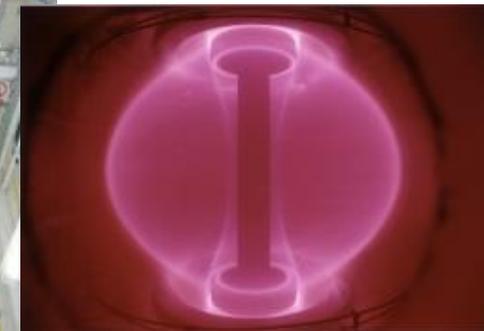


Dentro al JET
(nel lato destro è mostrato il plasma)

Possiede / gestisce dal 2000
MAST (Mega Amp Spherical Tokamak),
il programma di fusione del Regno Unito



MAST spherical tokamak

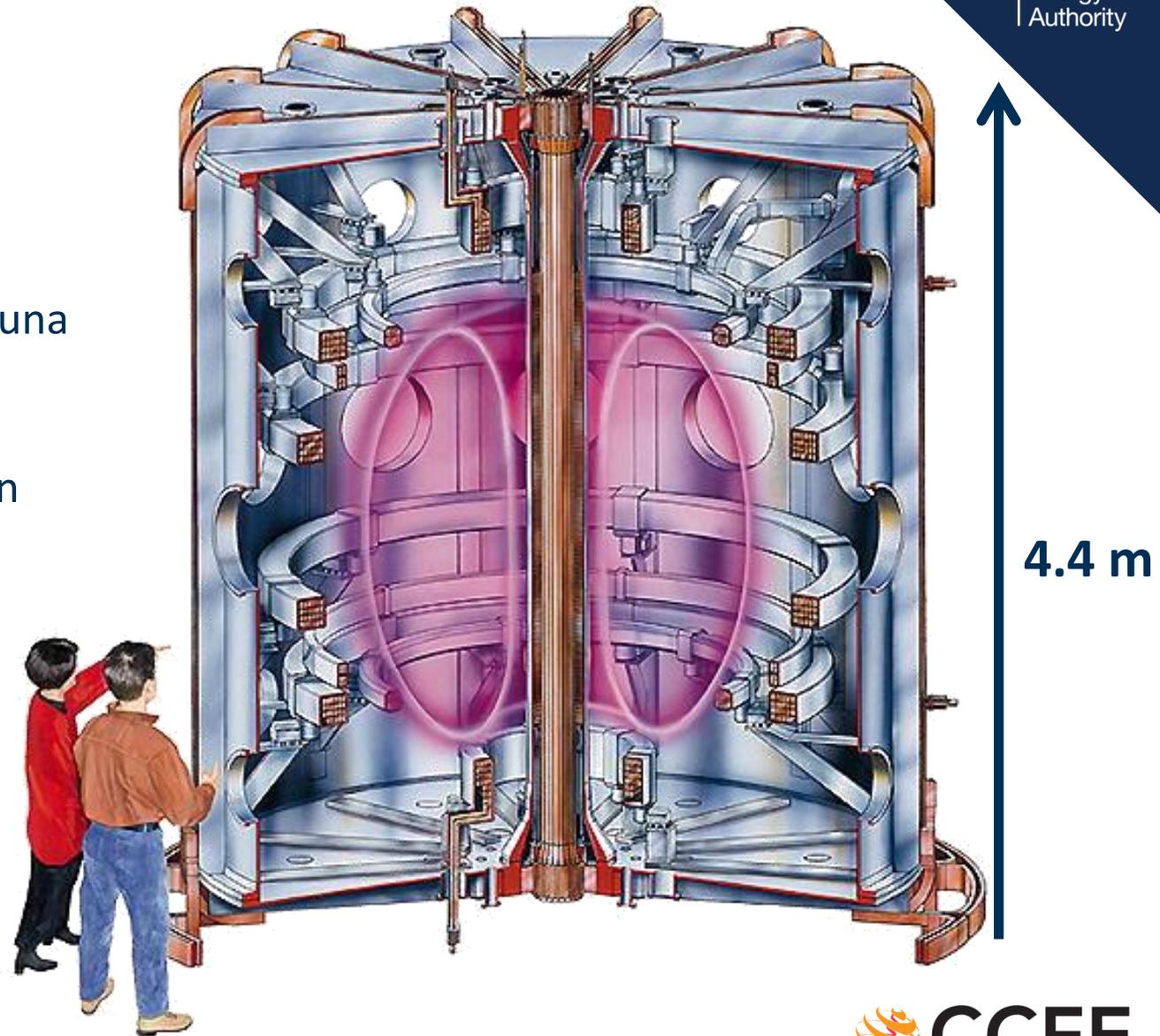
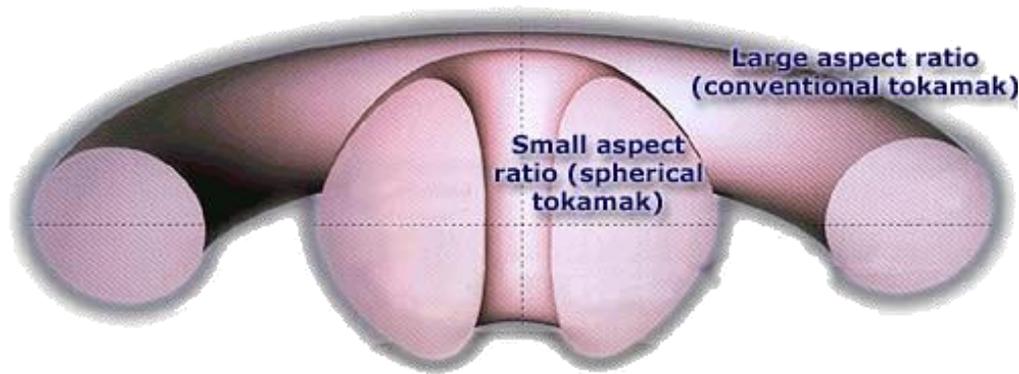


Mega Amp Spherical Tokamak

Ignizione: il calore prodotto dalle reazioni di fusione auto-sostiene le reazioni stesse

I "tokamaks sferici" contengono i plasmi in campi magnetici più stretti e compatti e hanno la forma di una mela.

Il design sferico produce plasmi ad alta pressione con campi magnetici relativamente bassi ed economici.



Problematiche

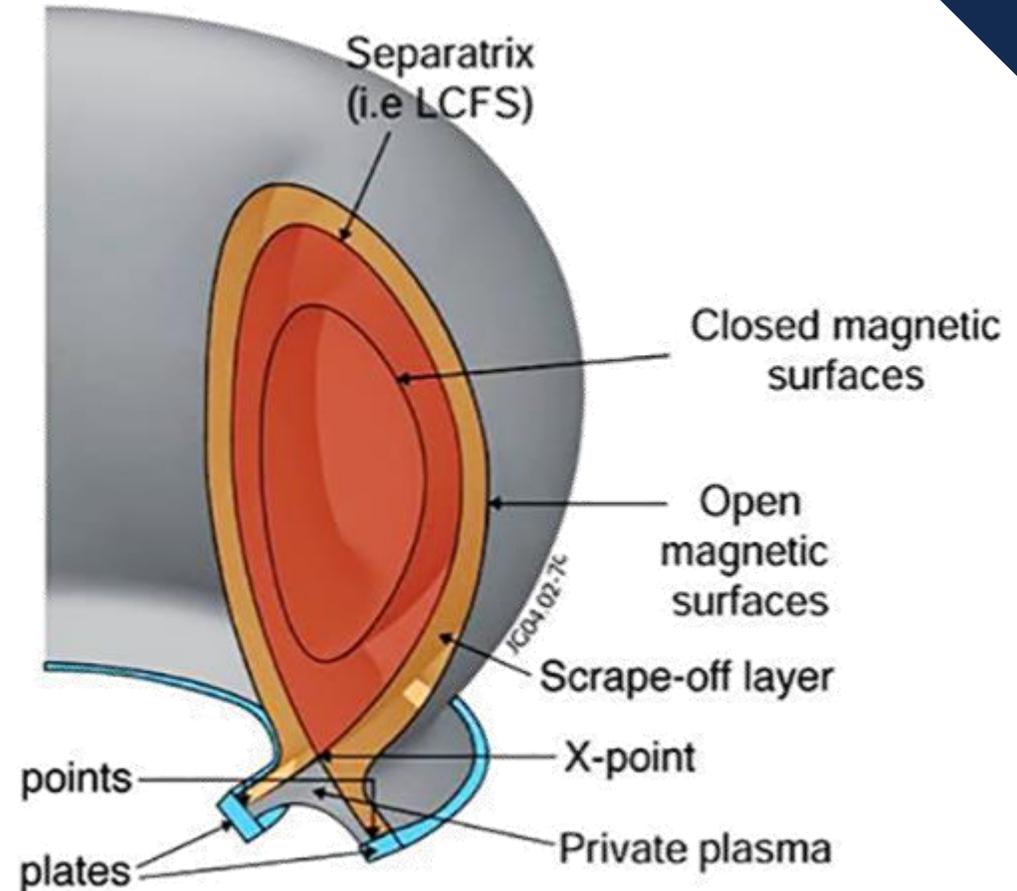
Una delle sfide principali, nello sviluppo dei reattori a fusione nucleare è rappresentata dalla possibilità di far convivere le **altissime potenze** in gioco nel plasma con la necessità di **proteggere i componenti del reattore affacciati al plasma**, tra cui la prima parete.

Il trasporto di particelle verso la parete, dovuto a turbolenze del plasma, contribuisce significativamente alla sua erosione e alla perdita di energia.

Esiste una soluzione affidabile al problema dello smaltimento del calore e delle particelle prodotte dalla reazione di fusione?

Confinamento

- Il confinamento del plasma in un tokamak è possibile grazie alle linee del campo magnetico che formano un insieme di superfici magnetiche chiuse.
- In un reattore tokamak per la fusione nucleare il **divertore** è quella parte della parete su cui è deviato il plasma che sfugge ai campi magnetici di contenimento a causa delle instabilità intrinseche a cui questo fluido è soggetto.
- Sul bordo del plasma si individua una regione dello spessore di pochi centimetri (**SOL: Scrape-Off Layer**) con linee di campo aperte, in cui le particelle cariche (e l'energia ad esse associata) provenienti dal nucleo del plasma sono guidate attraverso la separatrice (l'ultima superficie chiusa) sulle piastre del divertore.

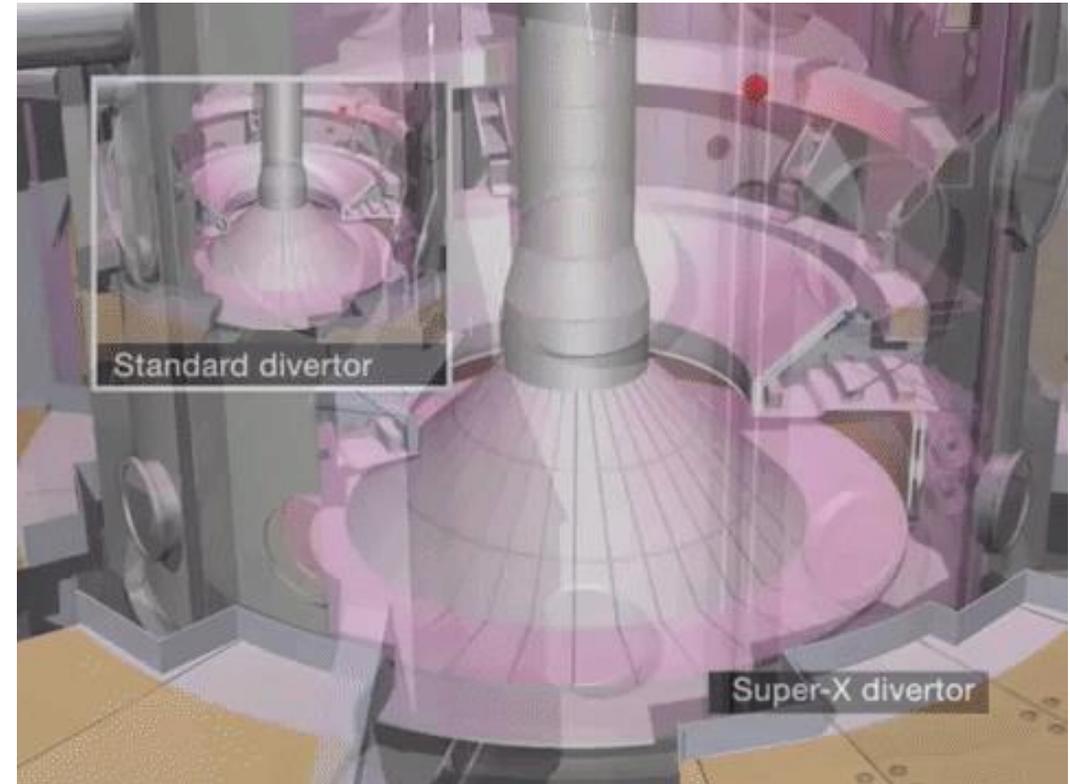


*Il bordo del plasma:
geometria dello Scrape-Off Layer (SOL) e
delle piastre del divertore*

Carichi termici

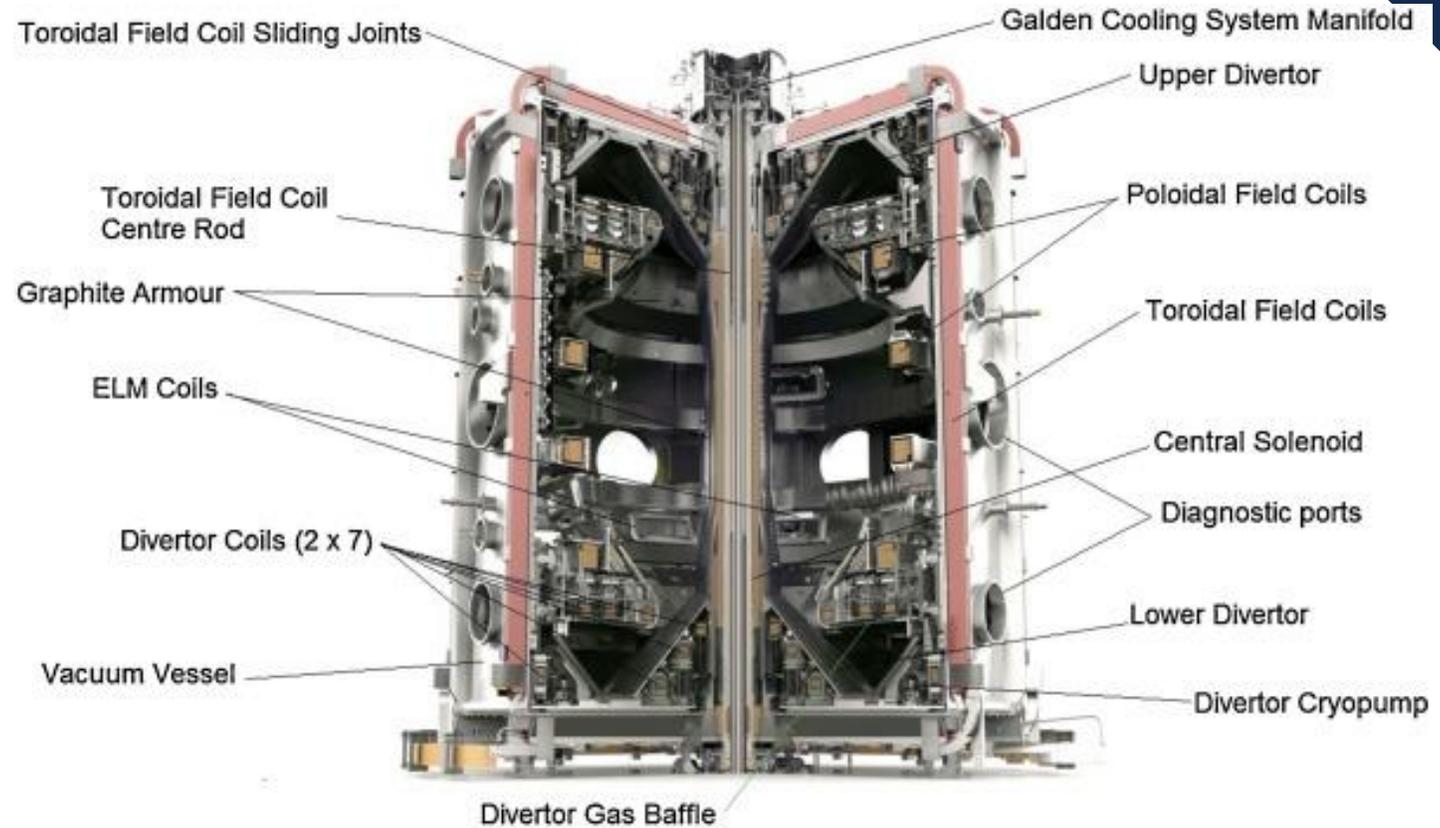
Il flusso termico uscente dal plasma è in gran parte associato a particelle cariche.

Il problema dei carichi termici sul divertore di un tokamak è attualmente affrontato dalla comunità scientifica internazionale seguendo approcci differenti, sia mediante lo **sviluppo di materiali innovativi in grado di sopportare i valori dei flussi termici previsti nei futuri reattori**, sia mediante lo **sviluppo di configurazioni magnetiche avanzate nella zona del divertore**, in grado di ridurre il carico sui materiali ridistribuendo il flusso termico su superfici più ampie come il **divertore Super-X** in MAST-Upgrade



MAST Upgrade

Cross-section of the MAST-U machine



Caratteristiche tecniche	MAST	MAST-Upgrade (2015)
Corrente di plasma	1.5 MA	2 MA
Durata impulso	0.6 s	5 s
I_{ROD} (correnti campo toroidale)	2.2 MA	3.2 MA
B_0 (Campo magnetico toroidale)	0,63 T	0,91 T
Divertore	Convenzionale	Super X (7 coils aggiunte)
Potenza ausiliaria (NBI)	3,8 MW	7.5 MW
Flusso magnetico di swing	0,7 Wb	1.6 Wb

Filamenti

Obiettivo: limitare le interazioni tra plasma e le pareti del reattore ed evitare la produzione di impurità

Nella strato più esterno del plasma a causa di varie instabilità e rapidi gradienti si generano delle turbolenze e si creano delle strutture filamentari.

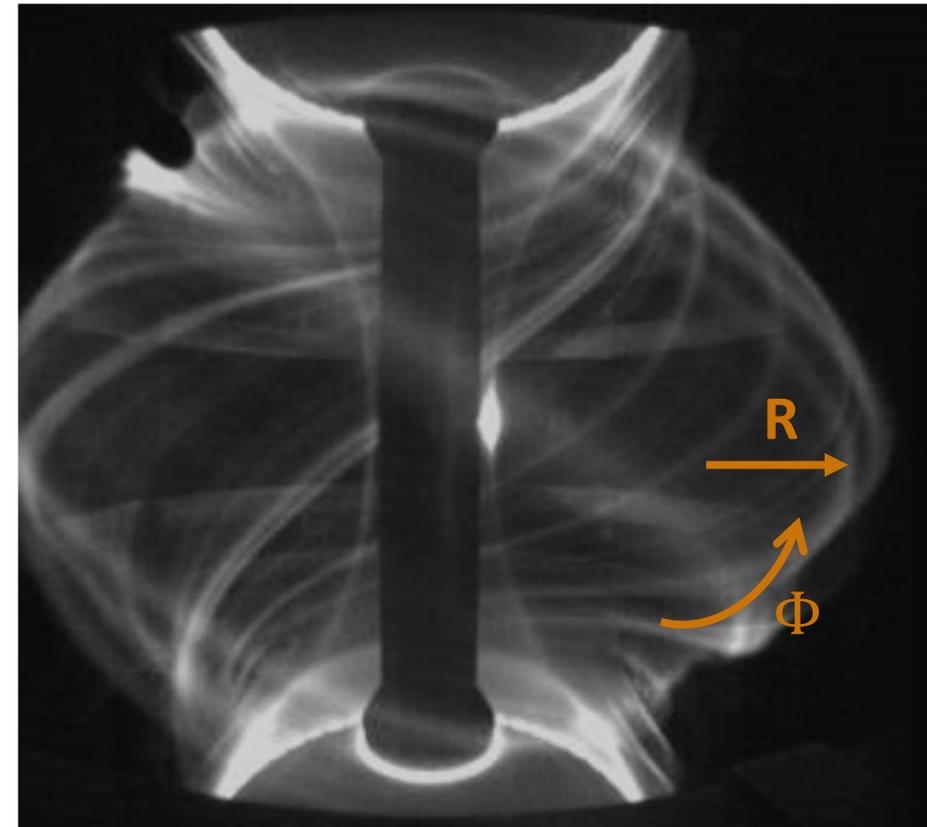
FILAMENTI → strutture intermittenti individuabili lungo le linee di campo magnetico al bordo del plasma e caratterizzate da maggiori densità e più alta temperatura.

Queste fluttuazioni possono portare ad un carico intermittente significativo sulla parete. È importante poter identificare i filamenti per poter poi procedere all'analisi del loro comportamento dinamico.

I filamenti si muovono lungo linee di campo magnetico presenti nel reattore e che sono ad esse allineati.

R identifica la posizione radiale

Φ identifica la posizione toroidale

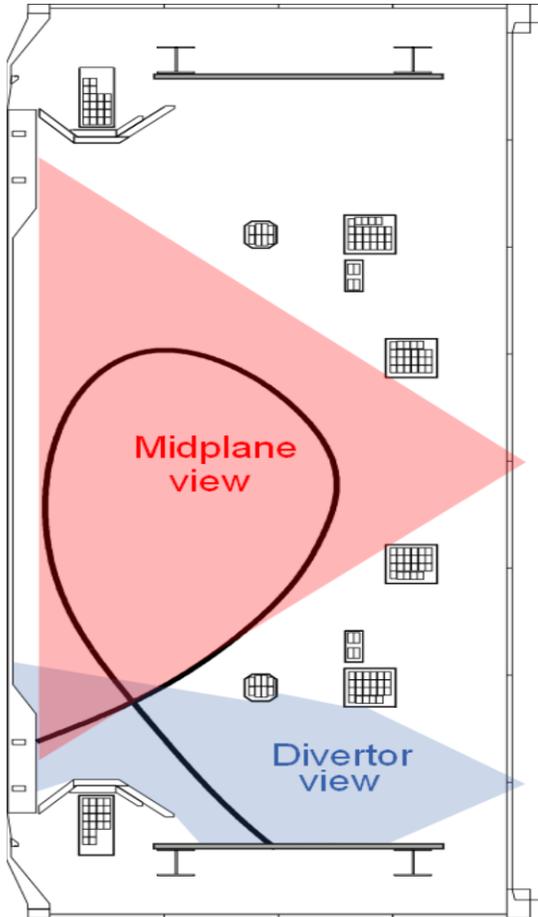


Analisi e identificazione dei filamenti

1. Analisi statistica dei filamenti dalle immagini di una Fast Camera installata in MAST (Tirocinio + Tesi di Laurea triennale)
2. Sviluppo di un rivelatore automatico di filamenti, la cui identificazione, in termini di posizione e grandezza, è eseguita a partire dalle immagini della Fast Camera per mezzo di una rete neurale convoluzionale

STEP 1 Acquisizione Immagini

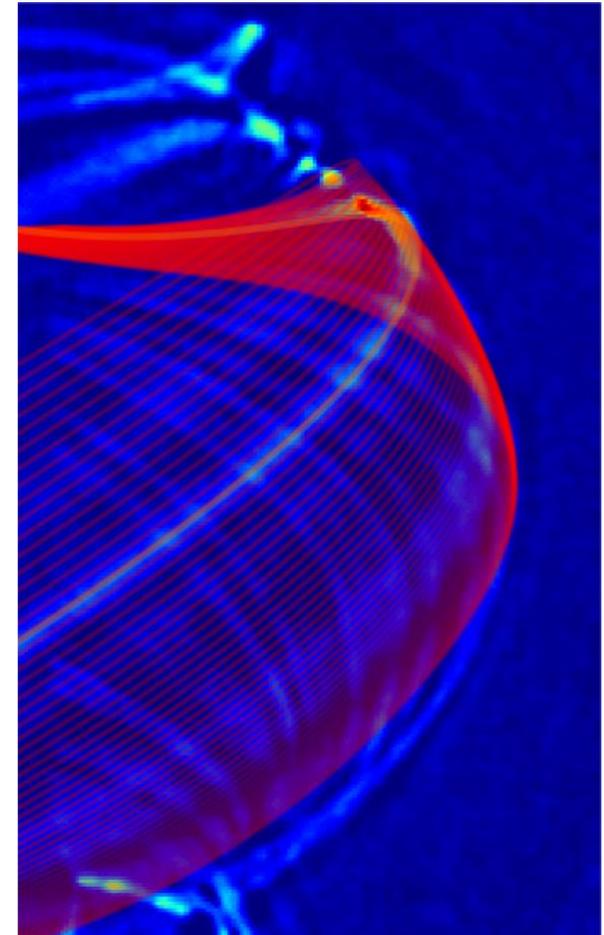
Tramite una video camera veloce (Fast Camera) Photron Sa1-1 installata su MAST è possibile filmare il plasma durante una scarica e registrare le emissioni luminose associate ai filamenti



**Fast camera
Photron SA1.1**

STEP 2: Ricostruzione e proiezione delle linee di campo magnetico.

Nota la tipologia magnetica, con un opportuna calibrazione si proiettano le linee di campo sulle immagini acquisite.

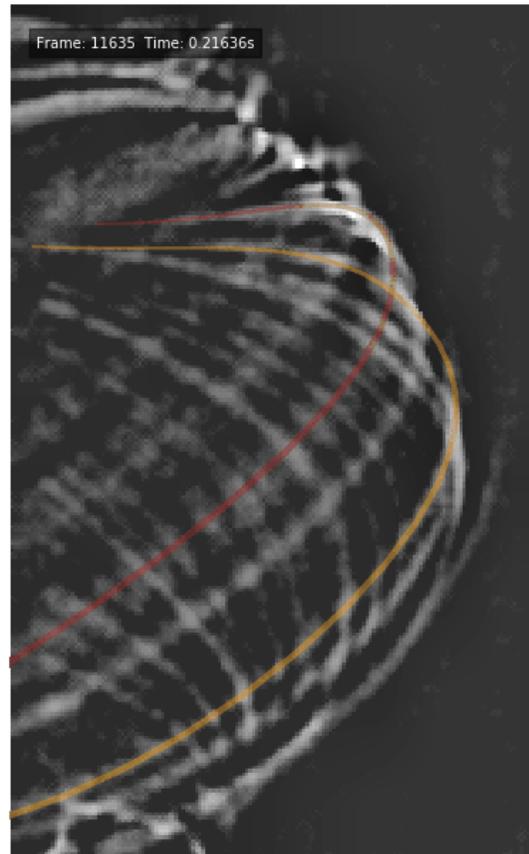


Identificazione tramite video camera

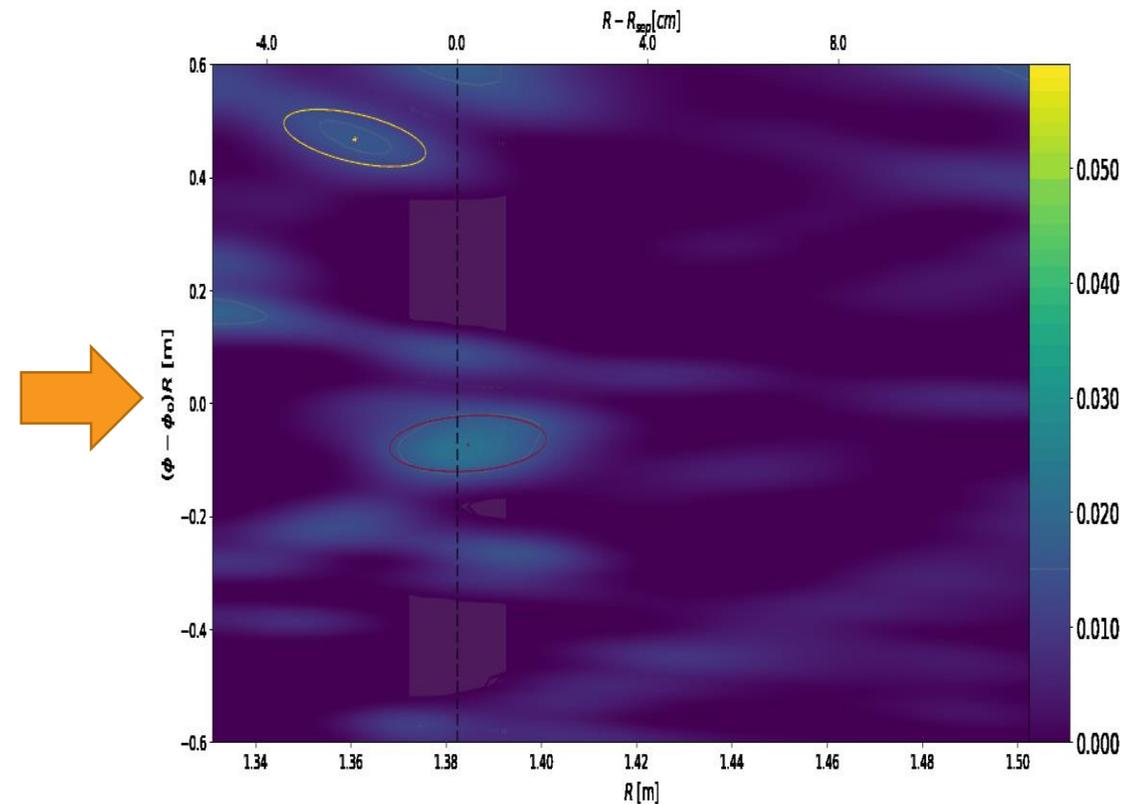
Il gruppo di ricerca del CCFE ha sviluppato e implementato un codice di calcolo, denominato **Elzar**, che elabora, attraverso alcuni metodi statistici, la distribuzione dell'intensità associata ai filamenti.

L'algoritmo implementato fornisce gli strumenti per l'identificazione dei filamenti e per trarre utili informazioni su di essi, come la **posizione**, la **dimensione**, la **forma**, l'**intensità** e la **dinamica** con cui essi si muovono lungo le linee di campo magnetico.

Visual Camera data



Processed data



ARTIFICIAL INTELLIGENCE

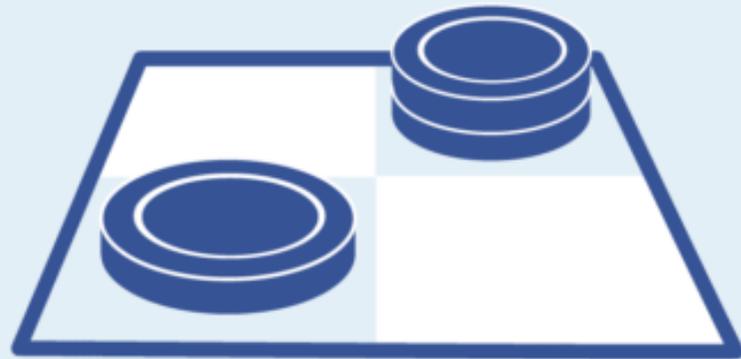
Qualsiasi tecnica che metta i computer nelle condizioni di simulare l'intelligenza umana, usando formule logiche, regole di consequenzialità, alberi decisionali e machine learning (compreso deep learning).

MACHINE LEARNING

Sottoinsieme dell'intelligenza artificiale, comprende regole statistiche che abilitano le macchine a migliorare le capacità con l'esperienza. Questa categoria include il deep learning.

DEEP LEARNING

Sottoinsieme del machine learning è composto da algoritmi che permettono al software di addestrarsi da solo per svolgere compiti, come il parlare e il riconoscimento del parlato, esponendo reti neurali multistrato a vaste quantità di dati.



La prima AI provoca eccitazione

Machine learning inizia a prosperare

Le scoperte di deep learning guidano il boom di AI

1950

1960

1970

1980

1990

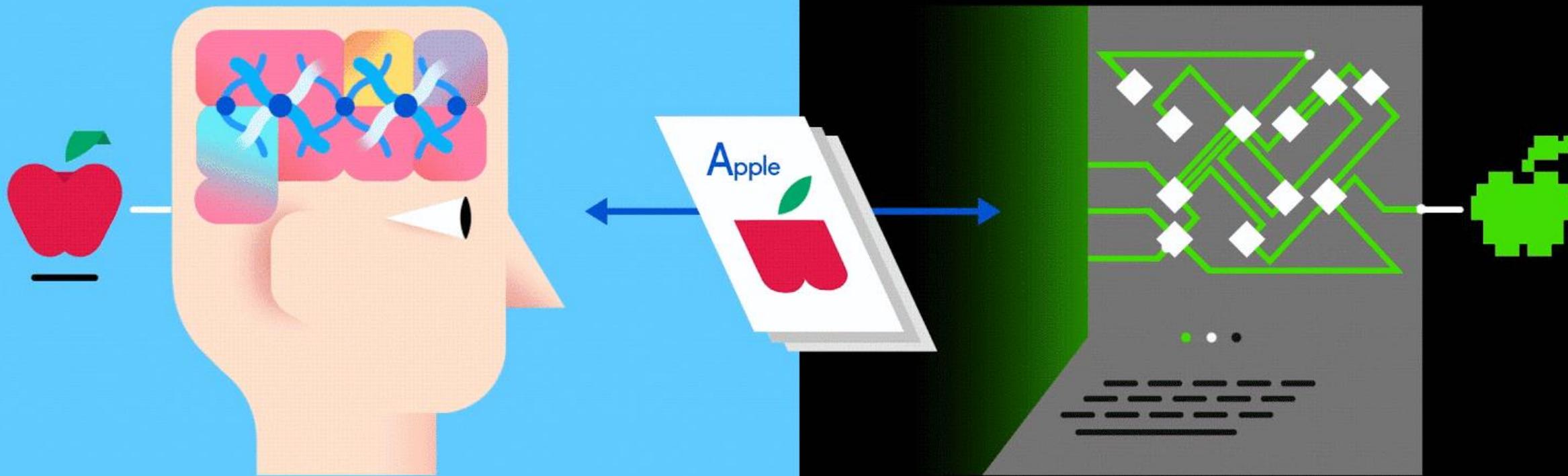
2000

2010

....

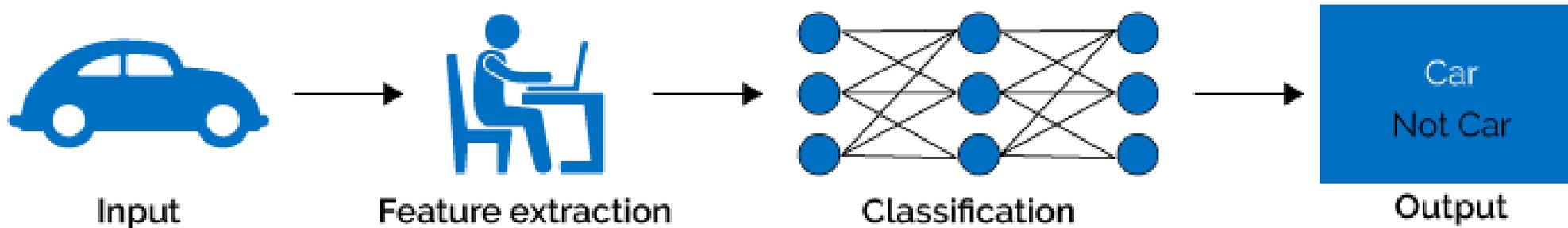
....

....

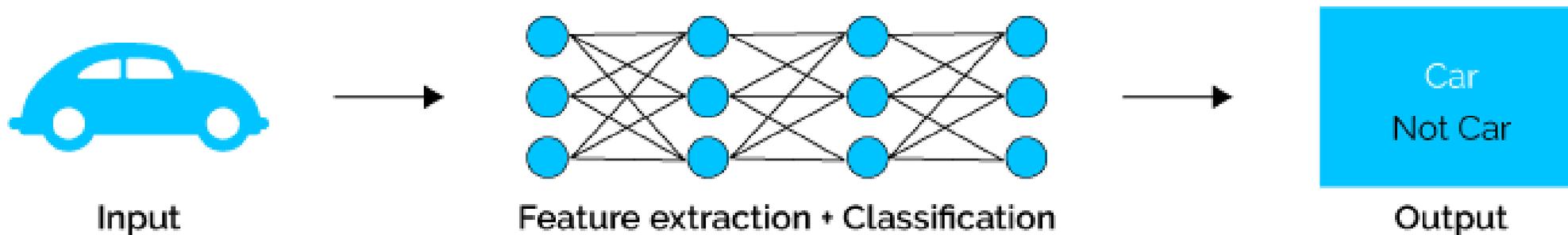


Deep Learning per il riconoscimento di oggetti

Machine Learning (Apprendimento automatico)



Deep Learning (Apprendimento profondo)

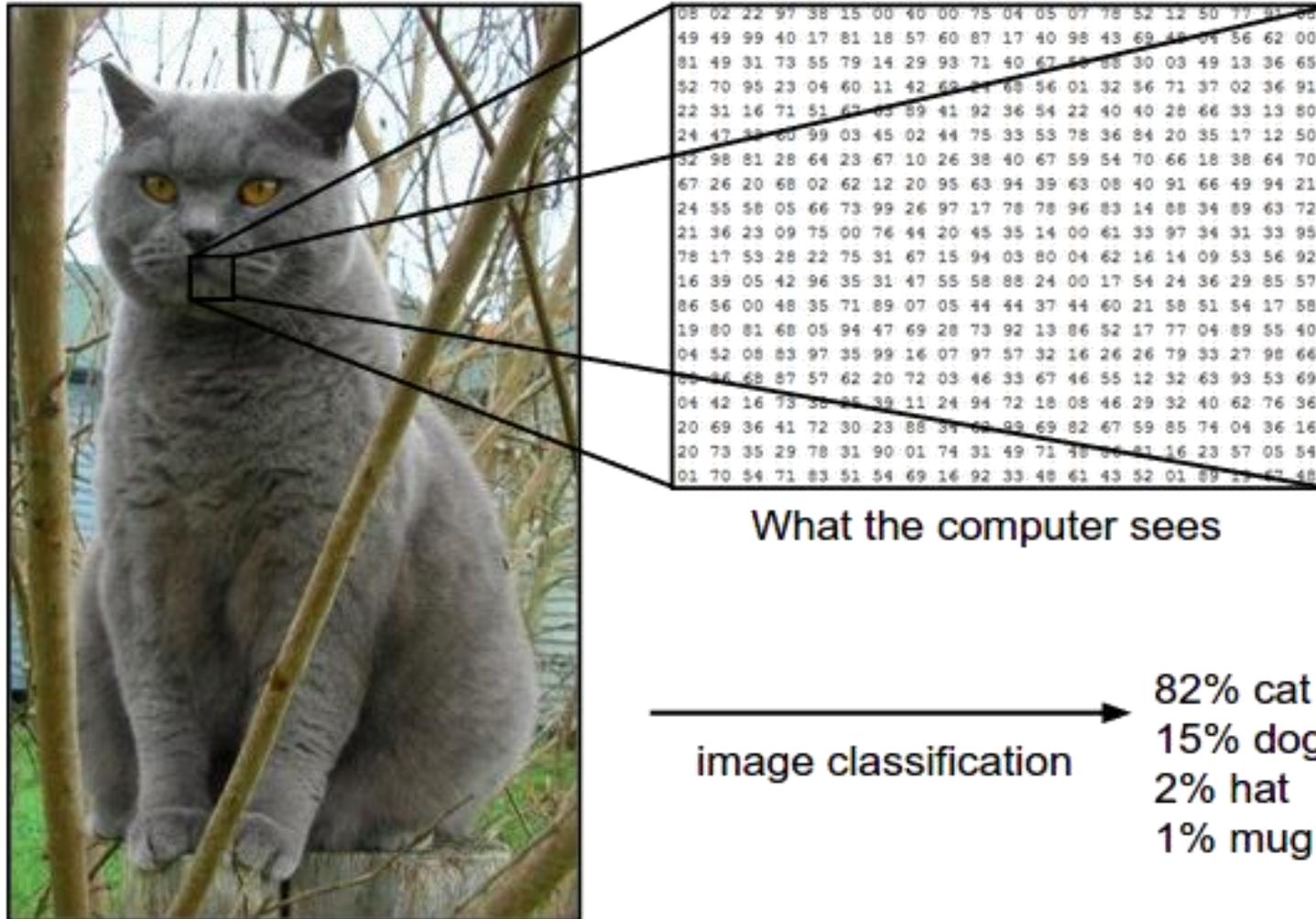


Convolutional Neural Network

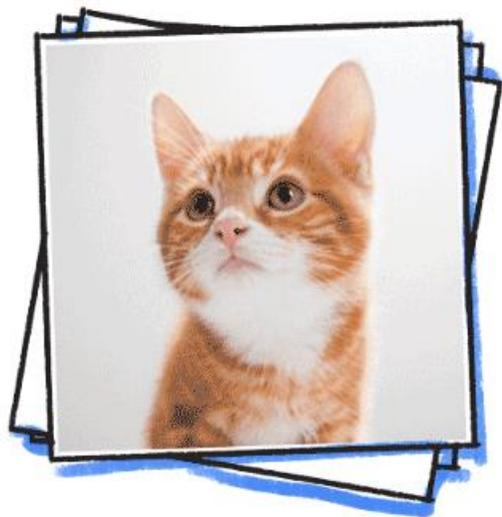
Immagine = insieme di pixels = insieme di vettore tridimensionali (larghezza × altezza × 3)

3: canali RGB (Red Green Blue)

Ogni coordinata è un numero tra 0 e 255 (intensità luminosa)

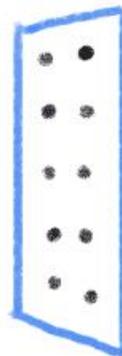
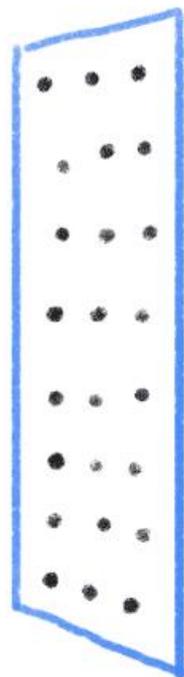
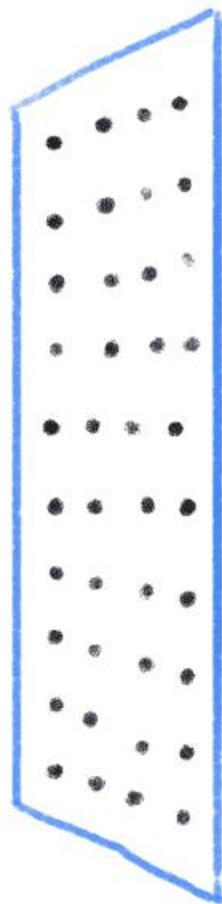
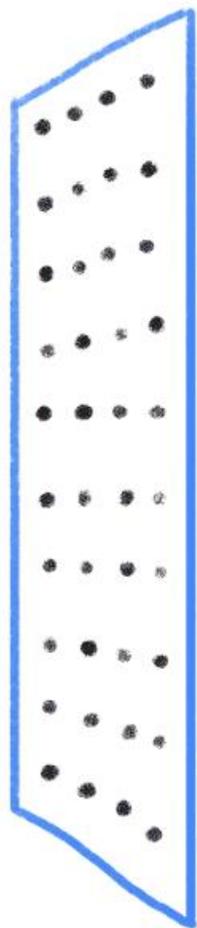


CAT



(LBELED
PHOTOS)

DOG



OUTPUT

Rilevamento e localizzazione di oggetti tramite rete neurale

Classification



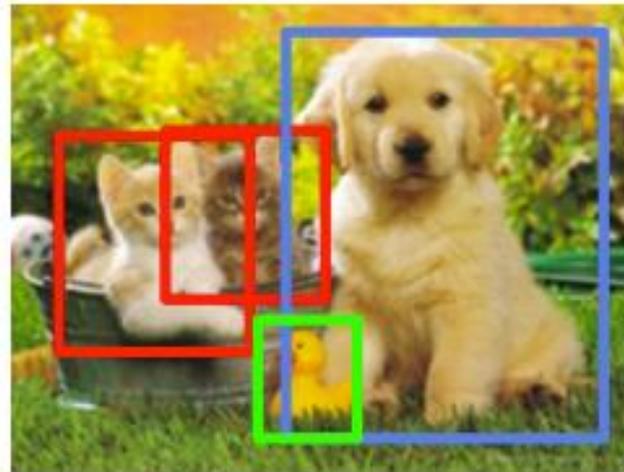
CAT

Classification + Localization



CAT

Object Detection



CAT, DOG, DUCK

Instance Segmentation



CAT, DOG, DUCK

Identificazione tramite Faster R-CNN

Database

- Il set di dati è stato creato attraverso una diagnostica sintetica, in grado di riprodurre immagini uguali a quelle acquisite dalla fast camera e i filamenti sono stati generati casualmente, variando posizione, dimensione e intensità, per riprodurre le proprietà statistiche dei filamenti sperimentali, osservati su misurazioni effettuate nel 2013 durante la campagna sperimentale MAST.
- Le linee di campo 3D presenti nelle immagini sintetiche sono quindi proiettate nel piano 2D tramite l'algoritmo ELZAR, generando le immagini 2D chiamate pseudo-invertite
- Ogni filamento appare nell'immagine pseudo-invertita come un oggetto ellittico inclinato, con una certa posizione e dimensione. Il comportamento di intensità di ciascun filamento è approssimato come una funzione gaussiana 2D.

Frame della Fast camera
generato tramite
diagnostica sintetica

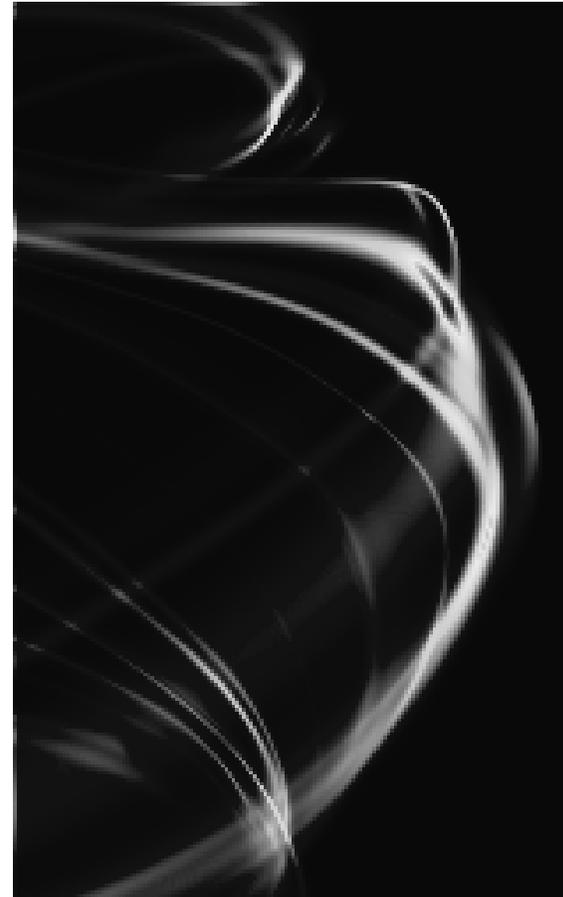
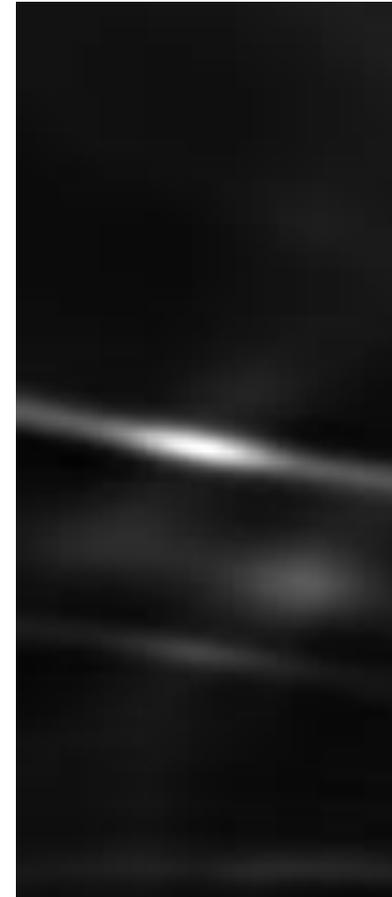


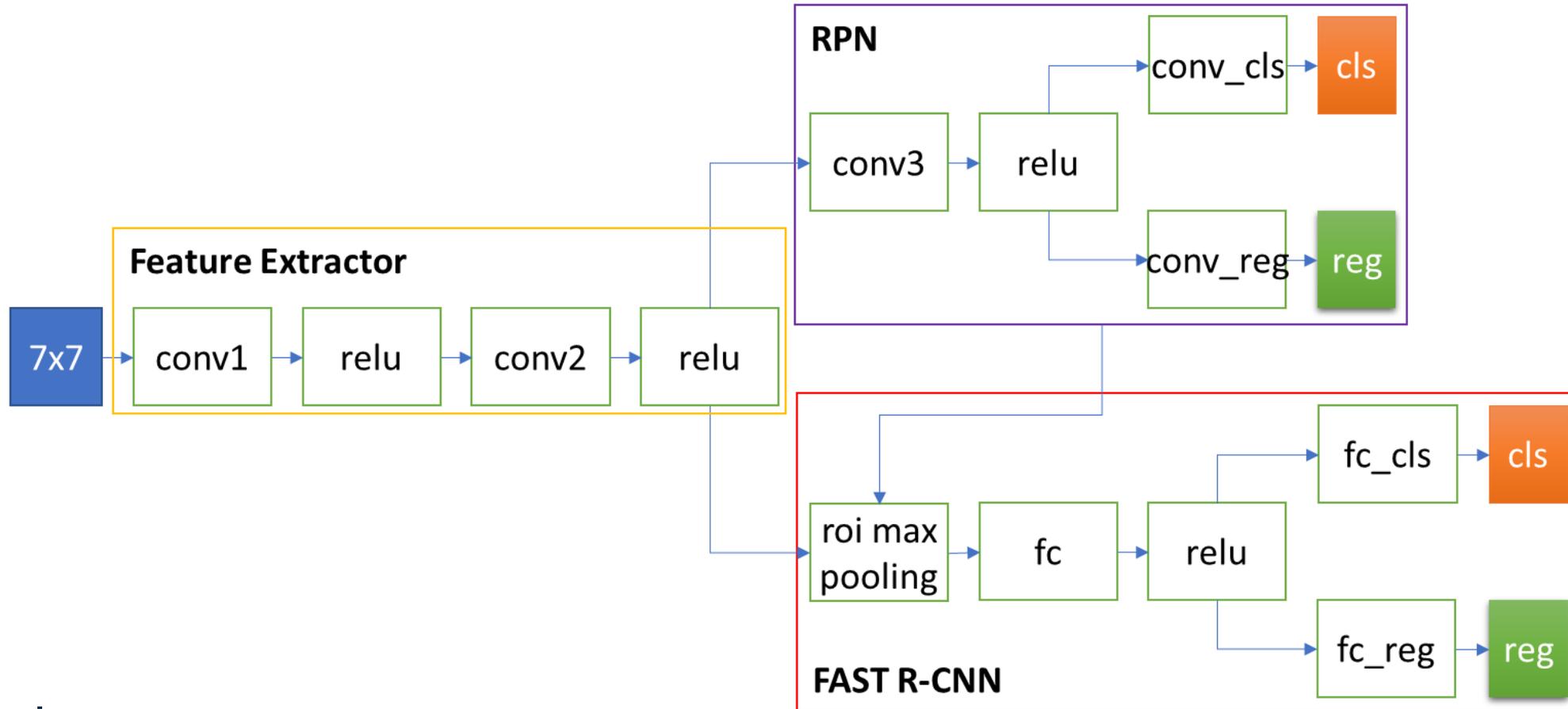
Immagine
pseudo-invertita



Identificazione tramite Faster R-CNN

Il dataset sintetico è formato da **5000** immagini pseudo-invertite di dimensione **71x161**,

→ **Input Faster-RCNN**



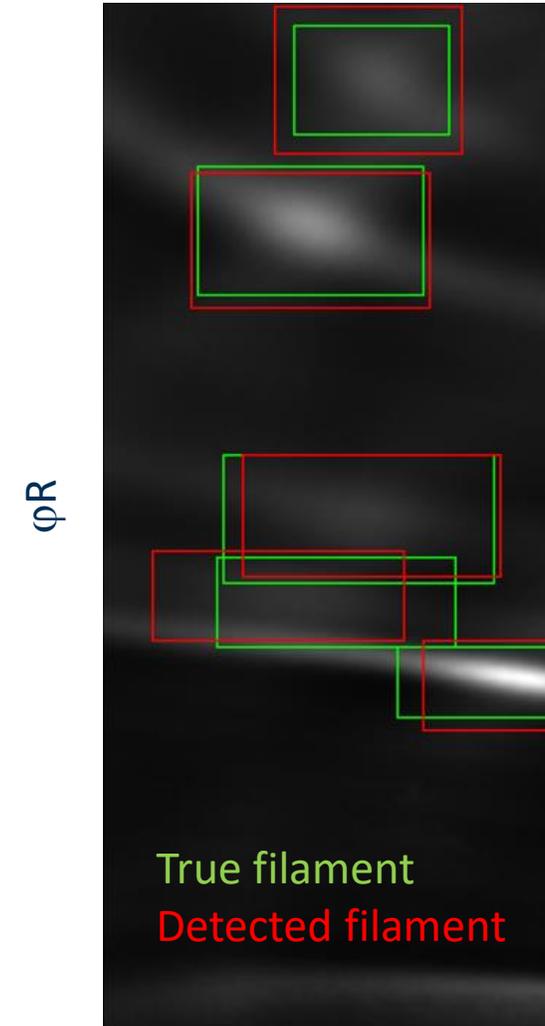
Identificazione tramite Faster R-CNN

- Training set: 4500 immagini con 36743 filamenti
- Test set: 500 immagini con 4143 filamenti

	# Filaments	True Positive	False Negative	False Positive
Training Set	36743	26791	9952	1988
Test Set	4143	3019	1124	213

$$Precision = \frac{True\ Positive}{True\ Positive + False\ Positive} = 93\%$$

$$Recall = \frac{True\ Positive}{True\ Positive + False\ Negative} = 73\%$$



True filament
Detected filament

R-R_{sep}

Sviluppi futuri

1. Miglioramenti delle prestazioni del rivelatore automatico di filamenti esplorando altre architetture neurali più performanti (p.e. RetinaNET)
2. Estendere il funzionamento del rivelatore ad un contesto real-time durante le prossime campagne sperimentali
3. Sviluppo di un sistema in grado non solo di identificare la posizione dei filamenti, ma anche di identificarne il tracking in modo da poterne analizzare il comportamento dinamico

References

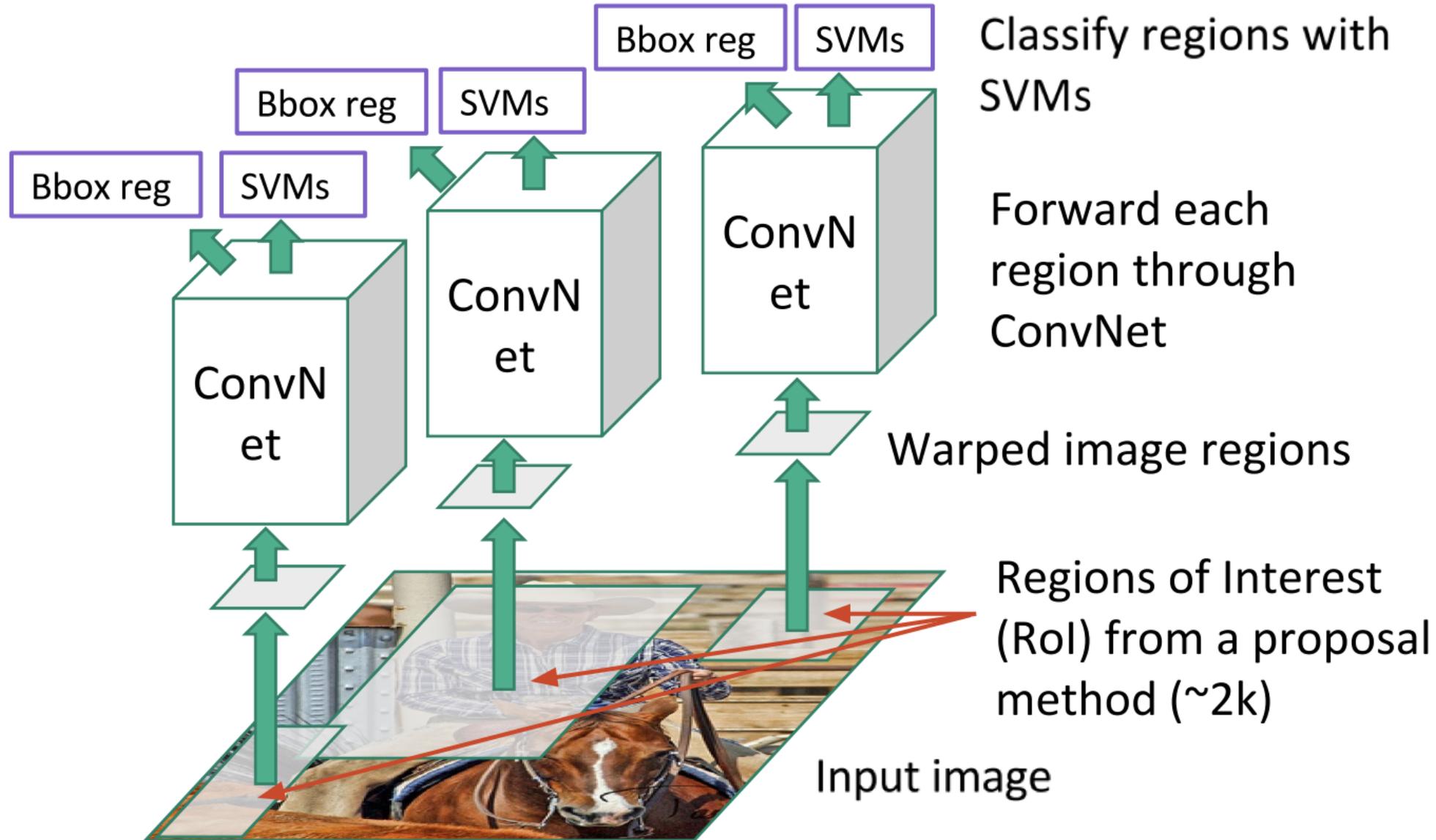
F. Militello, R. Akers, L. Appel, B. Cannas, S. Carcangiu, M. Carr, B. Dudson, T. Farley, A. Kirk, J. Harrison, D. Hoare, B. Lipschultz, A. Montisci, T. Nicholas, J.T. Omotani, F. Pisano, F. Riva, G. Sias, N.R. Walkden, A. Wynn and MAST and JET contributors,
“Predicting scrape-off layer profiles and filamentary transport for reactor relevant devices”,
In: 27th IAEA Fusion Energy Conference, 22-27 October 2018, India

Cannas, B., Carcangiu, S., Fanni, A., Lupelli, I., Militello, F., Montisci, A., Pisano, F., Sias, G., Walkden, N.,
“Convolutional neural networks for the identification of filaments from fast visual imaging cameras in tokamak reactors”,
(2019) Smart Innovation, Systems and Technologies, 102, pp. 167-177

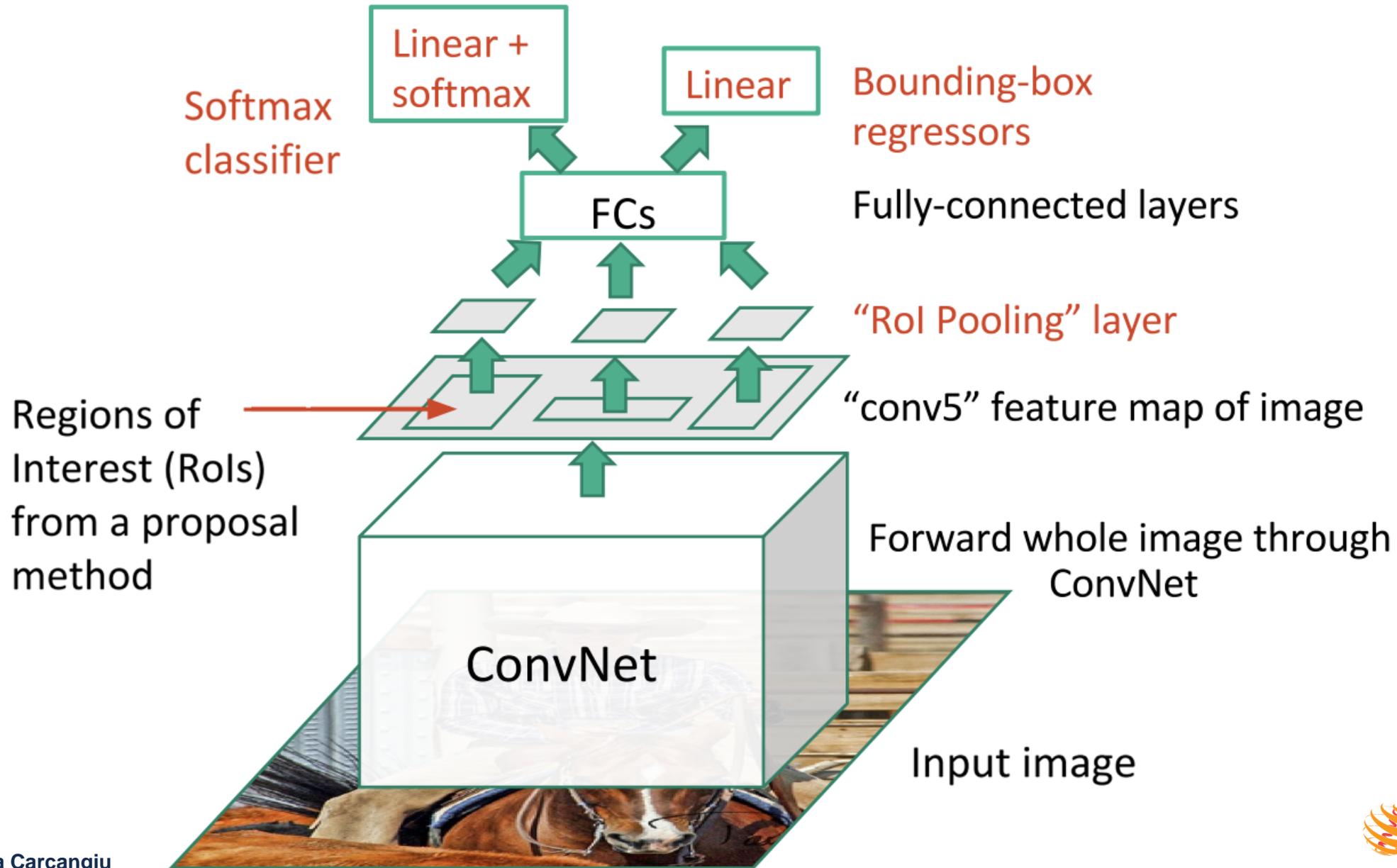
B. Cannas, S. Carcangiu, A. Fanni, T. Farley, F. Militello, A. Montisci, F. Pisano, G. Sias, N. Walkden,
Towards an automatic filament detector with a Faster R-CNN on MAST-U,
Fusion Engineering and Design, 2019

R-CNN

Linear Regression for bounding box offsets



Fast R-CNN



Faster R-CNN

